

А.В. БОРЦОВ, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»,
О.Л. РЕЗИНКИН, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА С СУБМИКРОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ

Створена система керування та захисту імпульсного високовольтного генератора з коротким фронтом. Запропоновано декілька удосконалень існуючих електронних вузлів, які використаються у системах керування та захисту високовольтних генераторів.

Створена система керування та захисту імпульсного високовольтного генератора з коротким фронтом. Запропоновано декілька удосконалень існуючих електронних вузлів, які використаються у системах керування та захисту високовольтних генераторів.

The system of control and defence of high-voltage pulses with short front is created. A few improvements of existent electronic devices, which will be utilized in the system control and defence of high-voltage generators, are offered.

Высоковольтные импульсные генераторы с коротким фронтом ($T_f \leq 100$ нс) в настоящее время находят широкое применение, как для научных, так и для технологических целей [1 – 3].

Импульсный высоковольтный генератор для электрофизических установок содержит следующие узлы (рис. 1): источник энергии – однофазная или трехфазная сеть, сетевой выпрямитель, сглаживающий фильтр, однотактный или двухтактный инвертор напряжения, импульсный трансформатор, системы управления и защиты, нагрузка.

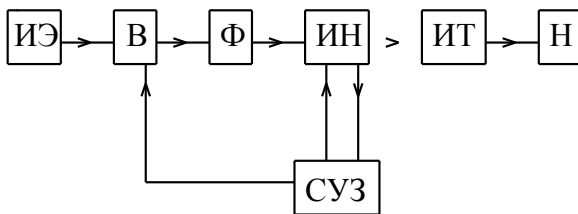


Рис. 1. Блок – схема импульсного высоковольтного генератора:
 ИЭ – источник энергии; В – сетевой выпрямитель; Ф – сглаживающий
 фильтр; ИН – инвертор напряжения; ИТ – импульсный трансформатор;
 Н – нагрузка; СУЗ – системы управления и защиты.

Сетевой выпрямитель, как правило, выполняется по мостовым схемам выпрямления – схема Греча для однофазной сети, схема Ларионова для трехфазной сети. В качестве выпрямителей можно использовать регулируе-

мые одно – и трехфазные выпрямители.

Основными узлами силового контура импульсного высоковольтного генератора являются: инвертор напряжения, преобразующий постоянное напряжение в импульсное и импульсный трансформатор, обеспечивающий в нагрузке требуемые параметры импульсов тока и напряжения.

Неотъемлемой частью высоковольтного генератора является система управления и защиты (СУЗ), которая должна выполнять следующие функции:

- регулировать амплитуду импульсов напряжения на нагрузке;
- задавать временные характеристики (длительность фронта, длительность импульса, частота, с возможностью плавной регулировки) импульсов напряжения на нагрузке;
- устранять “сквозные” токи в двухтактных преобразователях;
- ограничивать максимальные токи и напряжения ключевых элементов в аварийных ситуациях.

Разработанная система управления и защиты состоит из следующих модулей (рис. 2):

- модуль питания – А1;
- модуль регулировки напряжения – А2;
- измеритель тока с гальванической “развязкой” – А3;
- задающий генератор с плавной регулировкой частоты следования импульсов – А4;
- модуль устранения “сквозных” и ограничения максимальных токов через ключевые элементы – А5;
- электронный таймер – А6;
- модуль “начальной установки” – А7;
- один, два или четыре драйвера управления ключевыми элементами с гальванической “развязкой” – А8 – А11.

Модуль питания А1 состоит из понижающего сетевого трансформатора *TV1*, мостового выпрямителя *VD1*, фильтра *C2*, компенсационного стабилизатора *DA1* и высокочастотного преобразователя напряжения (*VT1*, *VT2*, *TV2*, *VD4* – *VD7*, *L2* – *L5*, *C5* – *C8*). Стабилизатор напряжения обеспечивает питание всех электронных узлов СУЗ стабильным напряжением +15 В. Высокочастотный преобразователь напряжения (по схеме Ройера) предназначен для питания напряжением ± 15 В драйверов управления. В зависимости от вида импульсов в нагрузке (однополярные или двуполярные) преобразователь напряжения имеет одно, два или четыре выходных напряжения. Гальваническая “развязка” СУЗ и драйверов управления осуществляется как по цепи питания +15 В, так и по входу сигнала управления.

Модуль регулировки напряжения А2 обеспечивает широтно-импульсное управление оптимистором, входящего в однофазный мостовой выпрямитель установки ИКР. Модуль содержит:

- узел синхронизации с сетевым напряжением – *R4*, *R5*, *VD8*, *VT3*;

- интегратор – DA2.1, VT4, RP1, R7, R8, C9;
- компаратор – DA2.2, VT5, R9 – R14, RP2, C10;
- усилитель мощности – VT6, R15, R16.

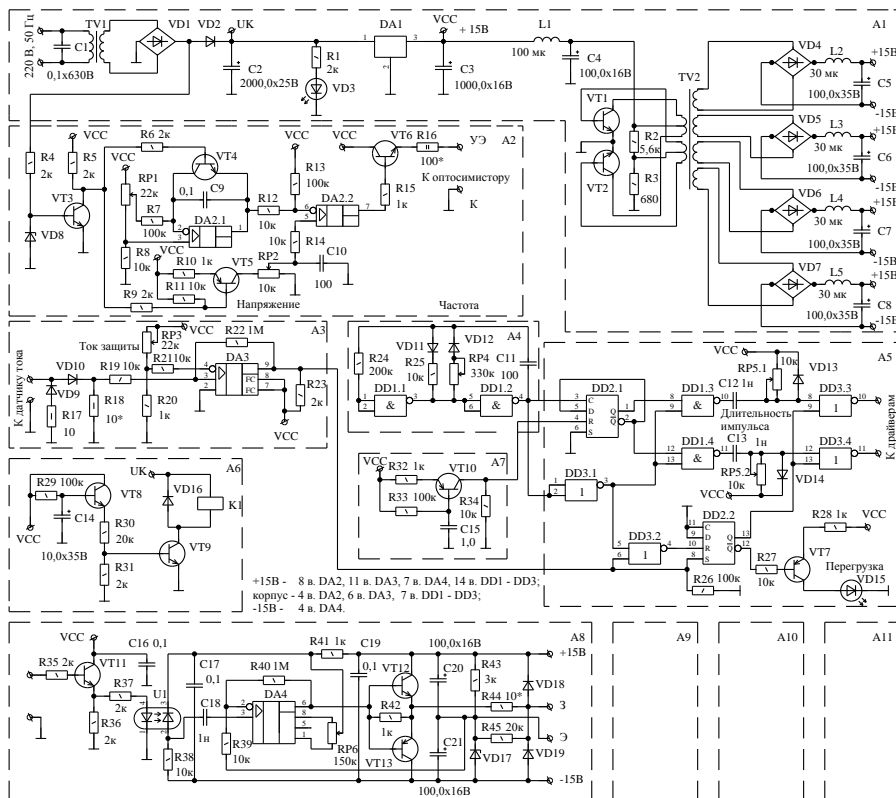


Рис. 2. Электрическая схема системы управления и защиты

Измеритель тока с гальванической “развязкой” A3 предназначен для контроля тока, протекающего через силовые ключи установки ИКР. Ток измеряется индукционным методом с помощью трансформатора тока. Сигнал напряжения, пропорциональный измеряемому току, с резистора R18 подается на неинвертирующий вход компаратора DA3. На инвертирующий вход компаратора подано опорное напряжение с помощью резистивного делителя RP3, R20. При достижении входного сигнала уровня опорного напряжения на выходе компаратора R23 формируется импульс перегрузки, который в модуле A5 выключает сигналы управления силовыми ключами.

Задающий генератор A4 собран на цифровых микросхемах КМОП – серии по классической схеме автогенератора с плавной регулировкой частоты.

Длительность импульса выбрана равной $(1,5 - 2)$ длительности времени выключения силовых ключей. Верхняя рабочая частота генератора в два раза выше максимальной частоты следования импульсов в нагрузке.

Анализ существующих схем позволил разработать единый модуль А5, включающий в себя модуль устранения “сквозных” токов (*DD2.1, DD3.1, DD1.3, DD1.4*), модуль ограничения тока в нагрузке (*DD2.2, DD3.2, R26 – R28, VT7, VD15*), модуль плавной регулировки длительности импульсов (*DD3.3, DD3.4, C12, C13, VD13, VD14, RP5*).

Работу модуля А5 проанализируем, используя эпюры напряжений в характерных точках схемы (рис. 3). По фронту тактового импульса (эпюра 1) запускается “делитель на 2” на *D*-триггере (*DD2.1*), на выходе которого получаются два противофазных сигнала (эпюры 3, 4) с периодом следования $T = 2 T_r$. Непосредственно эти импульсы для включения транзисторов инвертора использовать нельзя, так как существуют моменты времени, в которые одновременно открыты транзисторы обоих плеч мостового инвертора и протекает “сквозной ток”. Для устранения “сквозных токов” используется импульс 2 (эпюра 2), по спаду которого выключаются интегральные ключи *DD1.3* и *DD1.4* на время равное $T_{и} = T_{з} = (1,5 - 2)T_{\text{выкл}}$, и таким образом устраняются “сквозные токи” в инверторе.

При нормальном режиме работы – импульс перегрузки по току имеет низкий уровень (эпюра 7), импульс 8 устанавливает выход *D*-триггера *DD2.2* в нулевое состояние и сигналы 5, 6 проходят через ключи *DD3.1* и *DD3.2* на выход электронного узла (эпюры 11 и 12). Импульсы 11 и 12 разделены между собой интервалом времени, исключающим протекание “сквозного тока”. Далее импульсы 11 и 12 поступают на входы соответствующих драйверов, управляющих силовыми ключами.

В случае протекания через инвертор аварийного тока измеритель тока выдает импульс перегрузки длительностью $T_{\text{пер}}$ (эпюры 7 и 9), который устанавливает выход *D*-триггера *DD2.2* в единичное состояние, тем самым закрывая ключи *DD3.1* и *DD3.2* на время действия перегрузки по току. В результате выходные импульсы 11 и 12 уменьшаются по длительности и ограничивают ток в инверторе на безопасном уровне. При снятии перегрузки по току нормальный режим работы восстанавливается автоматически.

Электронный таймер А6 предназначен для ограничения зарядного тока емкостного накопителя при первом включении установки ИКР. В течение ~ 1 сек заряд конденсатора происходит через мощный ограничительный резистор. Потом срабатывает электронный таймер А6, включается реле *K1* и своими контактами шунтирует ограничительный резистор.

Важную роль в работе СУЗ ВЭФУ ИКР играет модуль “начальной установки” А7. При подаче напряжения питания в высоковольтной установке ИКР, в системе управления и защиты в течение некоторого времени (~ 0,1 сек) устанавливается рабочий режим. В это время возможен процесс неконтролируемого включения высокого напряжения в нагрузку. Для устранения этой возможности модуль “начальной установки” А7 в течение ~ 0,5 сек блокирует сигналы управления силовыми ключами.

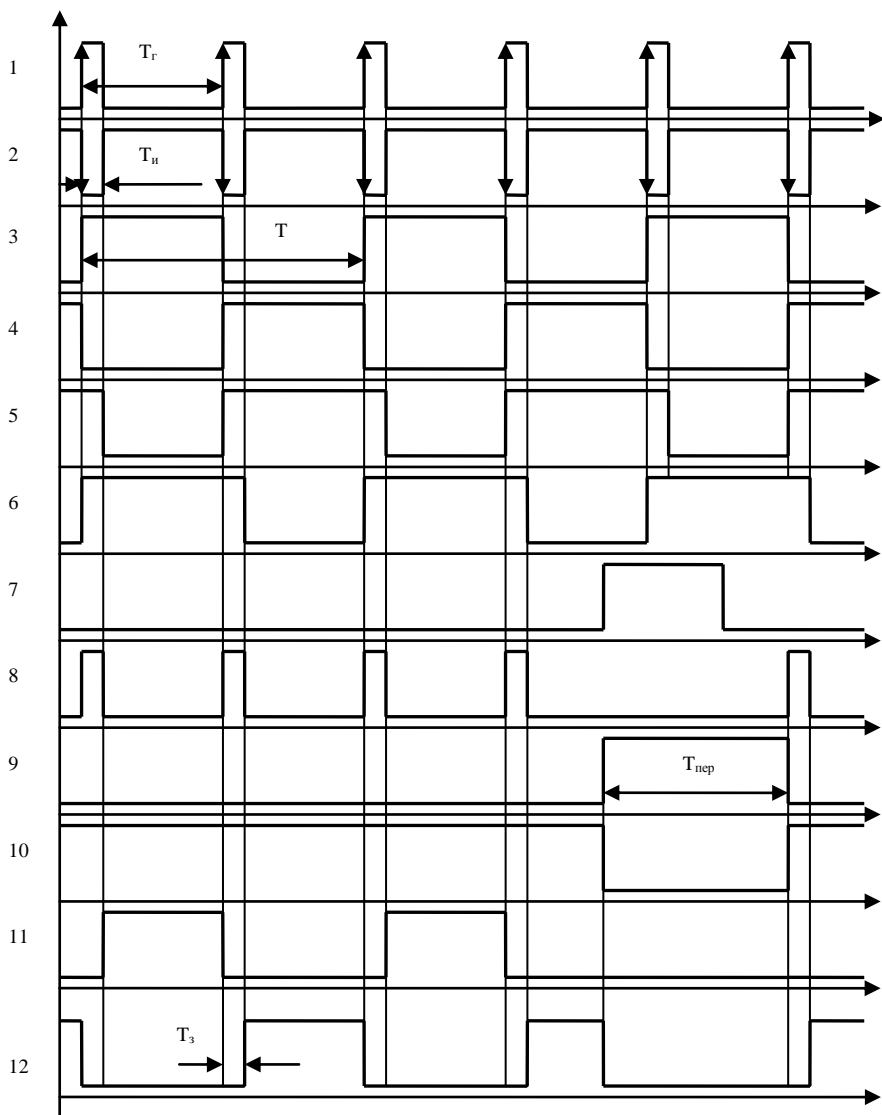


Рис. 3. Эпюры напряжений в характерных точках системы управления и защиты: $T_{\text{И}}$, T_{Γ} – длительность и период следования тактовых импульсов; T – период следования выходных импульсов; $T_{\text{пер}}$ – длительность импульса перегрузки; $T_{\text{з}}$ – длительность задержки включения силовых ключей.

По истечению этого времени модуль “начальной установки” не влияет на работу СУЗ.

Потребность в разработке быстродействующих драйверов (А8 – А11) управления *IGBT* – и *MOSFET* – транзисторов с гальванической “развязкой” вызвана необходимостью формирования мощных, коротких импульсов управления (длительность импульса ≤ 1 мкс) и недостатками (возможность “тиристорного защелкивания”, дороговизна) промышленных образцов (например, драйверов *IR2117*, *IR2213* фирмы *International Rectifier*).

На входе драйверов для гальванической “развязки” включен быстродействующий диодный оптрон *U1* (АОД130А). Время нарастания и спада сигнала АОД130А не превышает 100 нс. Сигнал с выхода оптрона подается на неинвертирующий быстродействующий усилитель ОУ КР544УД2А. Двухтактный усилитель мощности на СВЧ – транзисторах КТ972А и КТ973А обеспечивает необходимые мощность и уровни сигналов управления. Питается драйвер от высокочастотного преобразователя модуля питания А1.

СУЗ помещена в заземленный металлический экран. По цепям питания установлены фильтры из малоиндуктивных керамических конденсаторов. Связи между модулями и органами управления выполнены экранированными витыми парами.

Выводы.

1. Разработана система управления и защиты высоковольтным генератором. При разработке СУЗ решена проблема электромагнитной совместимости системы управления при работе генератора, особенно при использовании систем обострения фронта импульса напряжения на нагрузке.

2. Решен ряд схемотехнических задач:

- усовершенствован интегратор в широтно-импульсном регуляторе напряжения;

- разработан единый модуль ограничения “сквозных” и максимальных токов в ключевых элементах;

- разработан быстродействующий драйвер управления *IGBT* – и *MOSFET* – транзисторов с гальванической “развязкой”.

Список литературы: 1. Высоковольтные электротехнологии. Уч. пос. по курсу «Основы электротехнологии» для студ – в вузов / О.А. Аношин, А.А. Белогловский, И.П. Верещагин и др.: Под ред. И.П. Верещагина. – М.: Изд – во МЭИ, 2000. – 204 с. 2. Озон и другие экологически чистые окислители: Наука и технологии: 31-й Всероссийский семинар. Москва, химический факультет МГУ, 2-3 июня 2010 г.: Сборник материалов/ Под ред. В.В. Лунина, В.Г. Самойловича, С.Н. Ткаченко. – М.: МАКС Пресс, 2010. – 292 с.; ил. 3. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. / Г.А. Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

Поступила в редколлегию 12.10.11